

卫星多波束天线对干扰源的抗干扰性能分析

章坚武^{1,2}, 李杰², 何赛灵¹

(1. 浙江大学 光与电磁波研究中心,浙江 杭州 310027; 2. 杭州电子科技大学 通信工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要: 卫星通信为达到覆盖区域和减少干扰采用了多波束或点波束天线技术,但来自覆盖区的某些干扰,特别是些有意干扰会造成通信卫星无法正常工作。主要从电子对抗的角度讨论卫星多波束天线的抗干扰能力,首先由卫星的星下点位置和相应地球站的地理位置来确定地球站在卫星多波束天线(MBA)覆盖图中所处的方位角和仰角,然后通过线性约束最小方差(LCMV)算法进行仿真。仿真结果表明,当期望信号源的位置确定之后,通过改变干扰源的位置或增加干扰源的数目,确实能达到有效地破坏卫星多波束天线的零陷效果的目的,使其无法正常工作。证明了干扰源的位置及数目对卫星多波束天线的性能有很大的影响。

关键词: 卫星通信; 多波束天线(MBA); LCMV 算法; 地球站; 星下点

中图分类号: TN927; TN821. 91

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X(2005)04-0483-04

Analysis of anti-interference ability of multi-beam satellite antenna

ZHANG Jian-wu^{1,2}, LI Jie², HE Sai-ling¹

(1. Center for Optical and Electromagnetic Research, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Satellite communication, using multi-beam or point-beam antenna technologies, can decrease the interferences and cover intended areas. Interferences from the satellite communication covering area, especially the expected interferences, will destroy the normal operation of the satellite communication. The anti-interference ability of a multi-beam satellite antenna was discussed from the counter-electron viewpoint. The azimuth and elevation of the earth station in the overlay of the satellite multi-beam antenna which depending on the geographical locations of the satellite bottom point and the earth station was first determined. The simulation was then carried out with the linearly constrained minimum variance (LCMV) algorithm. The simulation results show that when the location of the expected signal is fixed, the nulling performance of the satellite multi-beam antenna can be destroyed seriously by changing the locations of the interferences or adding the number of the interference sources. It is proved that the locations and the total number of the interference sources influence greatly the performance of the multi-beam antenna.

Key words: satellite communication; multi-beam antenna (MBA); LCMV algorithm; earth station; satellite bottom point

卫星通信采用多波束或点波束天线技术在满足覆盖区域的条件下可以有效减少干扰。但是由于覆盖地域广,卫星覆盖区域内存在着各类干扰,其中有些干扰是人为造成的。由于卫星通信系统

的自身特点,决定了其干扰主要在上行链路,上行干扰可以破坏转发器的正常工作,恶化星上解调性能,严重时可使其无法正常工作。

目前,多波束天线在卫星通信,特别是移动卫星

通信中应用愈来愈广泛,对各种不同方式的多波束天线的研究不断涌现^[1~3],其多波束天线在物理结构上对干扰的分辨和抑制能力愈来愈强。同时,在多波束天线的干扰抑制技术上也研究出很多算法,如自适应调零方法^[4]、LCMV算法^[5]以及基于神经网络的调零算法^[6],等等。其中 LCMV 算法能够在干扰方向使天线波束以极高的分辨率置零,其抗干扰能力极强。本文从干扰源的数目和入射角度这两个方面研究多波束天线的抗干扰性能。在将地球站的地理位置转化为在天线覆盖图中的方位角和仰角的基础上,通过计算机仿真对其性能进行研究。

1 地球站在卫星多波束天线坐标系中位置的确定

以具有 19 波束天线的同步卫星为例进行讨论。图 1 所示为卫星和地球站之间的几何关系^[7],E 是地球站,S 是卫星,O 是地心,M 是星下点,β 是卫星覆盖区所对应的地心角,d_s 是星下点到地球站 E 的夹角,θ 为地球站的仰角,即地球站 E、星下点 M、卫星 S 组成的平面内,以地球站 E 为顶点,从地平线转到卫星的角度,φ_a 是地球站的方位角,是地球站指向星下点的方向和地球站所在经线的夹角(图中未标出)。设地球站所处 E 点的经纬度为(φ₁, θ₁), 星下点 M 的经纬度为(φ₂, θ₂), 地球半径为 R_E, 卫星距地面高度为 S_M = h_E, 由上述这些条件,可得出卫星和地球站之间的各种几何关系。

1) 地球站的仰角 θ 及方位角 φ_a

$$\theta = \arctg \left[\frac{\cos \phi \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \phi_1 \sin \theta_2 - \frac{R_E}{R_E + h_E}}{\sqrt{1 - (\cos \phi \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \phi_1 \sin \theta_2)^2}} \right] \quad (1)$$

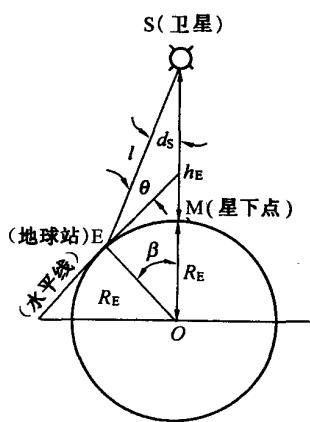


图 1 卫星和地球的几何关系

Fig. 1 Geometry relation of satellite and earth

万方数据

$$\phi_a = \arctg \left[\frac{\sin \phi \cos \theta_2}{\cos \phi \cos \theta_2 \sin \theta_1 - \cos \theta_1 \sin \theta_2} \right]. \quad (2)$$

式中: $\phi = |\phi_1 - \phi_2|$.

2) 由仰角 θ 确定 d_s

$$d_s = \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_E} \times \cos \theta \right). \quad (3)$$

由 d_s 及方位角 φ_a 即可确定 E 在卫星多波束天线覆盖图中所处的方位角和仰角。

图 2 所示为一个 19 波束天线的覆盖图,设其 3 dB 波束宽度为 2.5°,如果求出 d_s = 2°, φ_a = 30°, 则在此覆盖图中以原点为圆心, d_s = 2° 为半径画一个圆, 地球站位于圆周上的某一点, 然后再根据所求出的 φ_a 即可确定 E 在多波束天线覆盖图中的方位角和仰角。

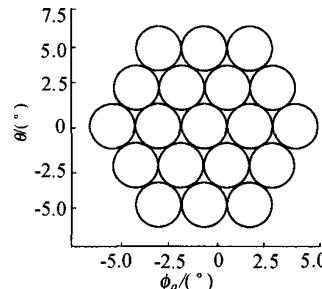


图 2 19 波束天线的覆盖图

Fig. 2 Overlay of antenna with 19 beams

当 E 在 M 的右侧时,E 点的方位角为 d_ssin φ_a, 反之,则 E 点的方位角为 -d_ssin φ_a。

当 E 位于北半球时,E 点的仰角为 d_scos φ_a, 反之,则 E 点的仰角为 -d_scos φ_a。

当由已知的地球站和卫星下点的实际地理位置确定出地球站在卫星多波束天线覆盖图中的方位角和仰角之后,就可以进行实际的系统仿真,从电子对抗的角度考察多波束天线的抗干扰性能。以下用 LCMV 算法进行仿真。

2 LCMV 算法原理简介

LCMV 算法原理如下: 假设天线有 M 个波束, 已知入射到天线上有 p 个期望信号, 其来波方向为 (θ₁, ..., θ_p); q 个干扰信号, 其来波方向为 (θ_{p+1}, ..., θ_{p+q}), 这里期望信号和干扰信号的总数要小于多波束天线的波束个数, 即 p+q < M, LCMV 波束合成器的准则是满足下列约束条件:

$$\min_W P(W) = \min_W (W^H \mathbf{R}_x W), \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$A^H W = e.$$

式中: \mathbf{W} 为多波束天线的加权系数矢量; \mathbf{R}_x 为多波束天线接收信号的相关矩阵;

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\Theta_1), \mathbf{a}(\Theta_2), \dots, \mathbf{a}(\Theta_{p+q})],$$

其中 $\mathbf{a}(\Theta_i)$ ($i=1, 2, \dots, p+q$) 是 $M \times 1$ 的列向量, 是多波束天线对来波方向为 Θ_i 的入射方向信号的响应矢量;

$$\mathbf{e} = [\underbrace{1, \dots, 1}_p, \underbrace{0, \dots, 0}_q]^H.$$

式(4)第二个约束条件是保证天线在期望信号方向的增益为 1, 而在干扰信号的来波方向响应为零, 从而对干扰进行有效的抑制。而第一个条件是为使天线输出功率最小, 以尽可能地抑制主波束外的其他信号或噪声。

利用 Lagrange 多项式求解, 可得加权矢量为

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{A} (\mathbf{A}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{e}. \quad (5)$$

3 仿真条件及结果

在仿真过程中, 已知地球半径 $R_E = 6378 \text{ km}$, $h_E = 35786.6 \text{ km}$, 卫星多波束天线的 3 dB 波束宽度为 2.5° 。假设卫星星下点 M 所处的经纬度为 $(110^\circ, 0^\circ)$, 当改变地球站 1(期望信号源)和地球站 i ($i=2, 3, \dots$) (干扰信号源)所处的经纬度时, 可以看到干扰源的位置和数目对天线归零效果的影响。

首先从输出 SNR 的角度进行比较。图 3 为当期望信号源所处经纬度为 $(120^\circ, 14^\circ)$ 、干扰信号源 1 所处经纬度为 $(120^\circ, 15^\circ)$ 时, 多波束天线的方向图。从图中可以看出, 虽然期望信号源和干扰信号源的空间位置很近, 但是采用 LCMV 归零算法在干扰源的入射方向还是实现了很深的零陷。

其次再从输出信噪比的角度比较多波束天线的抗干扰性能。如表 1 所示, 当期望信号源所处的经纬度仍为 $(120^\circ, 14^\circ)$ 时, 它在多波束天线覆盖图中的方位角和仰角为 $(1.757^\circ, 2.415^\circ)$, 信噪比为

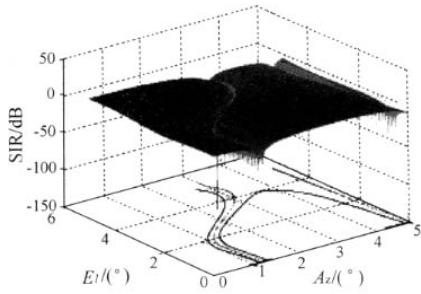


图 3 多波束天线的自适应调零方向图

Fig. 3 Adaptive nulling directional pattern of multibeam antenna

10 dB; 当干扰信号源所处的位置变化, 干噪比均为 50 dB 时, 采用 LCMV 算法进行 200 次叠代, 其不同干扰情况下输出 SINR 的比较。

从表 1 可以看出, 当仅有一个干扰信号源, 且此信号源与期望信号源不在同一波束内或在同一波束内但相距较远时, 其输出 SINR 没有太大的变化, 而随着两信号源的间距越来越近, 其输出 SINR 逐渐减小, 当干扰源所在经纬度为 $(119.9, 14)$ 时, 其输出 SINR 已经由 10 多分贝降到 -2.61 dB 。当增加干扰源的数目, 且干扰源一个在波束内, 而另一个在波束外时, 对输出 SINR 没有多大的影响; 当两个干扰源均在波束内时, 随着间距的减小, 其输出 SINR 也逐渐减小。从表 1 的最后一项可以看出, 当在期望信号源附近多增加几个干扰时, 其干扰效果可以与仅有 1 个干扰, 但是要求距离很近的情况相当。这说明, 当干扰信号无法离期望信号源很近时, 只要适当地多增加几个干扰信号, 也同样会使多波束调零天线的抗干扰能力有很大的下降。

本研究是以 19 波束天线进行仿真的, 在实际中应用很多的还有 64 波束、128 波束, 等等, 由于随着波束的增加, 天线的归零分辨率增大, 对其进行干扰的难度相应地也增大。

表 1 不同位置干扰源时的输出 SINR 比较

Tab. 1 Comparison of the output SINR with interference sources at different locations

干扰信号 经纬度 / (°)	$(Az, El)/ (^\circ)$	输出 SINR/dB
(125, 24)	(2.582 9, 3.920 7)	10.949 1
(115, 10)	(0.886 6, 1.759 8)	10.377 0
(119, 14)	(1.584 3, 2.419 9)	9.239 4
(119.5, 14)	(1.671 1, 2.415 8)	7.636 7
(119.9, 14)	(1.740 4, 2.412 4)	-2.612 0
(119, 14)	(1.584 3, 2.415 8)	8.895 0
(125, 24)	(2.582 9, 3.920 7)	8.712 0
(119, 14)	(1.584 3, 2.415 8)	8.426 4
(115, 10)	(0.886 6, 1.759 8)	8.167 9
(119, 14)	(1.584 3, 2.415 8)	-0.921 7
(120, 15)	(1.756 2, 2.577 8)	
(119, 14)	(1.584 3, 2.415 8)	
(120, 15)	(1.756 2, 2.577 8)	
(125, 24)	(2.582 9, 3.920 7)	
(119, 14)	(1.584 3, 2.415 8)	
(120, 15)	(1.756 2, 2.577 8)	
(120, 16)	(1.754 6, 2.742 8)	

4 结语

本文通过将地球站和卫星下点的实际地理位置转化为地球站在卫星多波束天线覆盖图中的方位角和仰角,从而通过 LCMV 算法对 MBA 的抗干扰性能进行仿真。仿真结果证明,当期望信号源的位置确定之后,通过改变干扰源的位置或增加干扰源的数目,即能达到有效地破坏卫星多波束天线的零陷效果的目的,使其无法正常工作。

参考文献(References):

- [1] GUEROUNI S P, ADAMYAN P, RAEVSKY V K, et al. Multibeam reflector antenna of the MM waveband [A]. *Fourth International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves"* [C]. Kahrkov, Ukraine: [s. n.], 2001: 610–611.
- [2] POPOVIC D, POPOVIC Z. Multibeam antennas with

polarization and angle diversity[J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, 2002, 50(5): 651–657.

- [3] ERIK L, DAN P, KHALIL M. Study of deployed and modular active phased-array multibeam satellite antenna[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, 45(5): 34–45.
- [4] MARSHALL J W, LE A Q. A nulling algorithm for multi-aperture multiple beam antennas [A]. *Military Communications Conference, 1994. MILCOM'94. Conference Record* [C]. [s. l.]: IEEE, 1994, 1: 27–31.
- [5] FROST O L. An algorithm for linearly constrained Sadaptive array processing[A]. *Proc. IEEE* [C]. [s. l.]: IEEE, 1972, 60: 926–935.
- [6] TONG Xin-hai, WANG Hua-li, GAN Zhong-min. Satellite interference location based on RBF neural network method [A]. *Signal Processing Proceedings, 2000. WCCC-ICSP 2000. 5th International Conference* [C]. [s. l.]: [s. n.], 2000, 1: 445–449.
- [7] 郑林华, 韩方景, 聂暉. 卫星移动通信原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

(上接第 477 页)

3 结语

根据一维薄膜光子晶体在光子禁带附近有较大色散的“超棱镜”效应,设计了高级次高反射膜系,它相对于常规的一级次高反射膜具有制备工艺简单的优点,虽然前者的光束位移有所减少,但它更利于实际制备,而出射光束空间色散的减少可以用增加反射次数来加以弥补,因为每增加一次反射,位移几乎可以增加一倍。因此这种高级次高反射膜设计为光通讯空间解复用器件的制备提供了一种更加可行的方法。

参考文献(References):

- [1] GU Pei-fu, BAI Sheng-yuan, LI Hai-feng, et al. Design of DWDM thin film interference filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22 (7): 794–797.
- [2] BALL G A, MOREY W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1994, 19: 1979–1981.
- [3] MUÑOZ P, PASTER D, CAPMANY J. Modeling and design of arrayed waveguide gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology, IEEE*, 2002, 20(4): 661–674.
- [4] MARTINA G, DAVIDA. Wavelength demultiplexer

using the spatial dispersion of multilayer thin-film structures[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2003, 15 (8): 1097–1099.

- [5] MATUSCHEK N, KARTNER F X, KELLER U. Theory of double-chirped mirrors [J]. *Journal of Selected Topics Quantum Electron, IEEE*, 1998, 4(2): 197–208.
- [6] WALMSLEY I, WAXER L, DORRER C. The role of dispersion in ultrafast optics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 1–29.
- [7] LENZ G, MADSEN C K, General optical all-pass filter structures for dispersion control in WDM systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17 (7): 1248–1254.
- [8] MADSEN C K, ZHAO J H. *Optical filter design and analysis-A signal processing approach* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999: 138–198.
- [9] MACLEOD H A. *Thin-film optical filters* [M]. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001: 456–521.
- [10] LIN S Y, HIETALA V M, WANG L, et al. Highly dispersive photonic band-gap prism[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1771–1773.
- [11] GERKEN M, MILLER D A B. Multilayer thin film structures with high spatial dispersion [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(7): 1330–1345.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>